



## Egzoszkieleł bojowy – wstępna analiza kinematyczna

Radosław BIELAWSKI<sup>1\*</sup>, Paweł PISKUR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instytut Lotnictwa i Obrony Powietrznej, Wydział Zarządzania i Dowodzenia,  
Akademia Obrony Narodowej, ul. Chruściela 103, 00-910 Warszawa

<sup>2</sup> Politechnika Koszalińska, Instytut Technologii i Edukacji,  
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

\* autor korespondencyjny, e-mail: r.bielawski@aon.edu.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 28.03.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 27.05.2014

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono pierwszy z kroków modelowania egzoszkieletu. Egzoszkieleł militarny to rodzaj robota zakładanego przez żołnierza w formie kombinezonu wspomagającego jego siłę i wytrzymałość. Dokonano głębokiej analizy literaturowej w poszukiwaniu światowych rozwiązań konstrukcyjnych poczynając od 1890 roku, kiedy to zgłoszono po raz pierwszy do opatentowania „urządzenie do ułatwiania chodzenia, biegania i skakania”. W artykule przedstawiono najważniejsze wymagania stawiane współczesnym egzoszkieletom. Jako przykład analizy zaprezentowano równania kinematyki jednej z kończyn dolnych. Zadanie kinematyki odwrotnej rozwiązano z wykorzystaniem logiki rozmytej. W części końcowej artykułu porównano wyniki otrzymane z równań zadania odwrotnego kinematyki z wynikami otrzymanymi z wykorzystaniem sieci neuronowych.

**Słowa kluczowe:** automatyka i robotyka, egzoszkieleł, układ mechatroniczny, kinematyka, modelowanie,

### 1. WSTĘP

Badania wykazują, że średnia masa żołnierza wynosi 85 kg, a jego dodatkowy ekwipunek nie powinien przekraczać 23 kg.

Podczas operacji „Iracka wolność” wyposażenie żołnierza amerykańskiego mieściło się w przedziale od 23,5 do 36 kg [11], a więc średnio ok. 30 kg. Stanowi to ok. 35% masy jego ciała. Przyrost masy w takim wymiarze wydaje się znaczący. Przeciężenia takie wpływają negatywnie na zdolności bojowe żołnierza, a także powodują liczne kontuzje i urazy.

Egzoszkielec to układ mechatroniczny – szczególna forma robota zakładana na żołnierza w formie pancerza. Metalowo-kompozytowa konstrukcja wyposażona jest w różnego typu siłowniki (elektromechaniczne, elektromagnetyczne, hydrauliczne, pneumatyczne itp.). Całość konstrukcji sterowana jest na podstawie sygnałów od użytkownika. Poprawność wykonywanych ruchów wspomaga sterownik, który otrzymuje sygnały w torze sprzężenia zwrotnego od czujników: siły, położenia, kąta, prędkości, przyspieszenia itp.

Kinematyka jest nauką zajmującą się badaniem ruchu bez uwzględniania sił wywołujących zmianę położenia oraz sił hamujących ten proces [1]. W artykule przedstawiono jeden z pierwszych etapów modelowania egzoszkieletu, jakim jest analiza kinematyki kończyny dolnej egzoszkieletu.

## 2. ŚWIATOWE KONSTRUKCJE

Pierwsze pionierskie pomysły stworzenia egzoszkieletu pochodzą z 1890 roku. Nikołaj Jagn w USA opatentował (patent nr US 420179 A) „Apparatus for facilitating walking, running and jumping”. Był to pancerz wykonany z drewna, którego celem było zwiększenie prędkości żołnierza podczas wielokilometrowego marszu. Konstrukcja ta była inspiracją do dalszych poszukiwań właściwego rozwiązania.

Pierwszą próbę skonstruowania egzoszkieletu podjęto w latach 60. minionego wieku. W Centrum Badawczo-Rozwojowym firmy General Electric (GE) podjęto działania, w wyniku których został opracowany HARDIMAN (*Human Augmentation Research and Development Investigation*). Prototyp o ograniczonych właściwościach ruchowych oraz mobilności miał zbyt duże wymiary i nie spełniał oczekiwań. Urządzenie było zdolne do przeniesienia ładunków o masie do 340 kg, lecz samo ramię robota miało masę 680 kg. Pomimo przeprowadzenia testów, zaniechano dalszych badań i rozwoju urządzenia.

W latach 80. ubiegłego wieku zaprojektowany został egzoszkielec o nazwie PITMAN. Ideą sterowania urządzenia były czujniki skanujące powierzchnie czaszki, umieszczone w hełmie. Jak na ówczesny postęp technologiczny, była to konstrukcja zbyt wymagająca. Ograniczeniami były tutaj komputery i ich moc obliczeniowa, która była wielce nieadekwatna do oczekiwanych rezultatów. Poza tym przetwarzanie sygnałów pochodzących z mózgu i zamiana ich na ruch egzoszkieletu były nieprawdopodobne.

Jedną z bardziej udanych konstrukcji jest stworzony w 2004 roku w Berkeley pod kierunkiem naukowym prof. Kazerooniego egzoszkieleł o nazwie BLEEX (*Berkeley Lower Extremity Exoskeleton*). Konstrukcja skupiona jest głównie na dolnych kończynach użytkownika. Składa się z ponad 40 siłowników hydraulicznych oraz sensorów. Czujniki zbierają informacje o kolejnych ruchach egzoszkieletu i przekazują je do komputera pokładowego, który analizuje i uaktywnia poszczególne siłowniki.



Rys. 1. Egzoszkieleł BLEEX [13]

Fig. 1. Exoskeleton BLEEX

Jednostka centralna oblicza i optymalizuje dystrybucję napięcia i ciężaru, rozkładając ją w taki sposób, aby odczuwalność użytkownika była jak najmniejsza. Egzoszkieleł dzięki takiemu zastosowaniu umożliwia swobodne noszenie obciążenia do 75 kg. W urządzeniu zastosowano czujniki tworzące lokalną sieć, której centrum tworzy procesor sterujący.

Kolejnym udanym projektem jest rozwijający się od 2009 roku egzoszkieleł o nazwie HULC (*Human Universal Load Carrier*). Projekt realizowany jest pod patronatem prof. Kazerooniego przez firmę Lockheed Martin, która wykupiła na niego licencję. Konstrukcja egzoszkieletu o masie 23 kg umożliwia przenoszenie ładunków o masie do 90 kg z prędkością maksymalną 16 km/h.



Rys. 2. Egzoszkielec HULC w zastosowaniu bojowym [14]

Fig. 2. Exoskeleton HULC in the combat application

Dominującym materiałem wykorzystanym w egzoszkielecie jest tytan. Tytan to lekki materiał o wysokich właściwościach mechaniczno-wytrzymałościowych, lecz stosunkowo drogi. Egzoszkielec wyposażony został w przysawki pozwalające na przenoszenie obiektów o masie do 68 kg (*lift assist device*). HULC zasilany jest czterema akumulatorami litowo-polimerowymi, pozwalającymi na właściwe działanie urządzenia przy optymalnym obciążeniu w czasie do 20 h. Egzoszkielec był testowany w różnych warunkach pola walki oraz przy różnorodnym obciążeniu. Po serii pomyślnych testów był on jesienią 2012 roku testowany w Afganistanie podczas konfliktu zbrojnego.

Kolejnym przykładem udanej konstrukcji współczesnego egzoszkieletu jest XOS. Sterowanie XOS oparte jest o 30 siłowników, które pełnią funkcję sztucznych stawów. Konstrukcja przypomina cyborga. Urządzenie zawiera liczne czujniki, przekazujące poprzez komputer sterujący sygnały do siłowników sterujących. W ten sposób następuje płynne i ciągłe sterowanie, w taki sposób, aby użytkownik nie odczuł żadnego znacznego wysiłku. Masa XOS to 68 kg. Egzoszkielec ten umożliwia statyczne podnoszenie ładunków o masie do 90 kg.



Rys. 3. Egzoszkielec XOS2 podczas testów [16]

Fig. 3. XOS 2 exoskeleton during testing

Na rynku krajowym coraz więcej ośrodków naukowo-badawczych i wdrożeniowych podejmuje prace nad opracowaniem egzoszkieletu. Dla przykładu można podać rozpoczęty w 2013 roku projekt opracowania egzoszkieletu TYTAN w ramach programu „Badania na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa”. Zakończenie projektu przewidziane jest w kwietniu 2015 roku [15].

### 3. WSPÓŁCZESNE WYMAGANIA

Biorąc pod uwagę dynamiczny rozwój techniczny w dziedzinie mechaniki, nowych materiałów konstrukcyjnych, elektroniki oraz systemów informatycznych, Departament US Army określił wymagania dotyczące egzoszkieleców bojowych (*The Mission Needs Statement for The Enhanced Integrated Soldier System-Dismounted TEISS-D*) w pięciu kluczowych obszarach:

- w zakresie żywotności: zapewnienie zwiększonych możliwości obserwacji dziennej i nocnej umożliwiające efektywne wykrycie, zlokalizowanie, rozpoznanie, sklasyfikowanie, zidentyfikowanie i zniszczenie obiektów przeciwnika;
- w zakresie mobilności: zredukowanie masy wyposażenia przy zapewnieniu zwiększonych możliwości bojowych, kompatybilność w działaniach wykonywanych przez różne rodzaje wojsk;
- w zakresie zdolności przetrwania: zapewnienie osłony przed ogniem bezpośrednim broni małokalibrowej, minami przeciwpiechotnymi oraz bronią zapalającą, a ponadto zapewnienie ochrony przed skutkami

użycia broni nuklearnej, biologicznej, chemicznej, mikrofalowej wysokiej mocy, energii skierowanej, rozpryskowej oraz „pociskom strzałkowym”. Dodatkowo zapewnienie ochrony słuchu, zapobieganie, zakłócanie lub mylenie systemu wykrywania przeciwnika; dostarczenie urządzeń ostrzegania przed różnego rodzaju zagrożeniami występującymi na polu walki, zapewnienie wysokiej trwałości produkowanego wyposażenia ochronnego, jak również trwałych urządzeń peryferyjnych wspomagających zmysł widzenia, słuchu i dotyku;

- w zakresie dowodzenia i kontroli: zapewnienie łączności głosowej, w tym utajnionej, wymiany danych, obrazów, map cyfrowych, zobrazowania grafiki, przekazywania i otrzymywania lokalizacji danego obiektu, zapewnienie świadomości sytuacyjnej oraz danych dotyczących aktualnej sytuacji w prowadzonych działaniach bojowych [10].

Powyższe wymogi są nadal adekwatne do modelowania i budowy egzoszkieleatów bojowych. Stanowią fundamentalne zasady podczas projektowania oraz wskazują na kierunki rozwoju tego typu urządzeń [12].

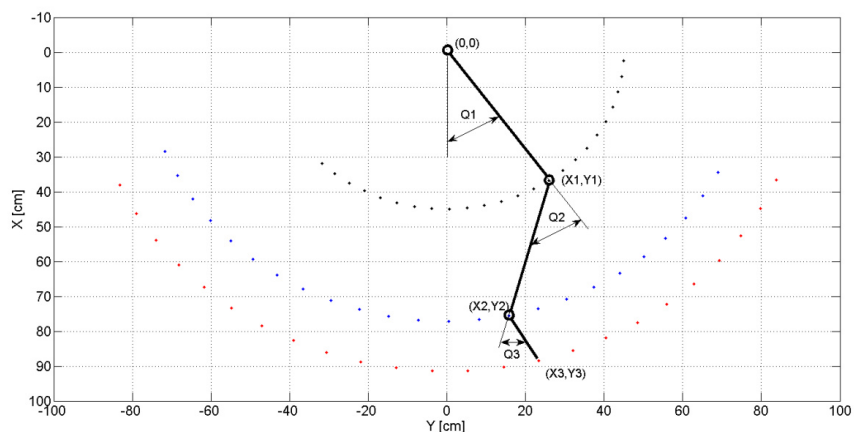
#### **4. ANALIZA KINEMATYKI EGZOSZKIELETU KOŃCZYN DOLNYCH ŻOŁNIERZA**

Analizie poddano kinematykę kończyn dolnych żołnierza. Zamodelowano zmianę położenia jednej z dwóch kończyn dolnych bez uwzględniania sił wywołujących ruch oraz sił hamujących [1]. Równania kinematyki opisują położenie układu współrzędnych związanych ze stopą żołnierza z układem współrzędnych związanym ze stawem biodrowym od strony kręgosłupa. Kończynę dolną zamodelowano jako układ geometrycznie płaski składający się z trzech sztywnych odcinków o długości  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ :

- $L1$  od stawu biodrowego do stawu kolanowego (udo),
- $L2$  od stawu kolanowego do stawu skokowego (podudzie),
- $L3$  od stawu skokowego do końca palców stopy.

Na rysunku 4 przedstawiono podstawowe zależności geometryczne. Zaprezentowany model jednej dolnej kończyny posiada trzy stopnie swobody, czyli potrzeba trzech niezależnych zmiennych położenia ( $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q3$ ) w celu określenia położenia geometrycznego wszystkich części składowych [2-4].

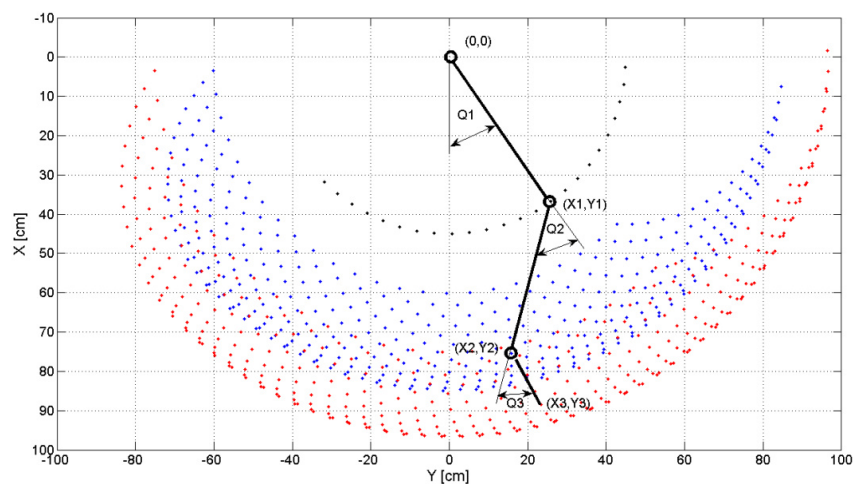
Podstawowym zadaniem w modelowaniu egzoszkieleatów jest wyznaczenie pozycji i orientacji elementów modelu w funkcji zmiennych przemieszczeń w przegubach (proste zadanie kinematyki).



Rys. 4. Uproszczony model dolnej kończyny człowieka (o trzech stopniach swobody)  
(opracowanie własne)

Fig. 4. A simplified model of the lower limb of man (with three degrees of freedom)  
(own description)

Na rysunku 5 przedstawiono zdyskretyzowany obszar ruchu kończyny dolnej egzoszkieletu (przestrzeni roboczej) dla wybranego przedziału kątów w przegubach. Za początek układu współrzędnych przyjęto kość miedniczną, co w egzoszkielecie odpowiada elementowi przymocowanemu do pleców żołnierza.



Rys. 5. Zdyskretyzowany obszar ruchu modelu kończyny dolnej człowieka  
(opracowanie własne)

Fig. 5. Discretized area of the model of human lower limb movement  
(own description)

Współrzędne punktów  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  zostały wyznaczone z zależności trygonometrycznych:

$$\begin{cases} x_1 = L_1 \cdot \cos(Q_1); \\ y_1 = L_1 \cdot \sin(Q_1); \\ x_2 = x_1 + L_2 \cdot \cos(Q_2); \\ y_2 = y_1 + L_2 \cdot \sin(Q_2); \\ x_3 = x_2 + L_3 \cdot \cos(Q_3); \\ y_3 = y_2 + L_3 \cdot \sin(Q_3); \end{cases} \quad (1)$$

Przyjęto również, że:

- kąt w przegubie stawu biodrowego ( $Q_1$ ) będzie się zmieniał od wartości  $-45$  do  $+90$  stopni;
- kąt w przegubie stawu kolanowego ( $Q_2$ ) będzie się zmieniał od wartości  $0$  do  $90$  stopni;
- kąt w przegubie stawu skokowego ( $Q_3$ ) będzie się zmieniał od wartości  $45$  do  $135$  stopni.

Często jednak operacja wyznaczenia geometrycznej zależności od współrzędnych konfiguracyjnych jest niewystarczająca [5], szczególnie w zadaniu wykonywania ruchu po określonej trajektorii. W zadaniu sterowania egzozszkieletami często danymi wejściowymi są współrzędna położenia  $(x_2, y_2)$  oraz orientacja stopy kończyny dolnej ( $Q_3$ ). Należy wtedy wyznaczyć kąty  $Q_1$  i  $Q_2$  dla danych wartości  $(x_2, y_2)$  przy określonym kącie  $Q_3$ , czyli rozwiązać zadanie odwrotne kinematyki. Kąt  $Q_3$  jest wyznaczany z warunku równoległości do podłoża.

Zadanie odwrotne kinematyki [8, 9] jest trudniejsze od zadania prostego kinematyki ze względu na niewystępowanie jednoznacznych rozwiązań, tzn. te same współrzędne  $(x_2, y_2)$  mogą zostać osiągnięte dla różnych wartości kątów  $Q_1$  i  $Q_2$ . Dla rozważanego egzozszkieletu regulator musi uwzględniać ograniczenia ruchowe kończyn dolnych człowieka. Istnienie lub brak rozwiązań równań kinematyki określa przestrzeń robocza egzozszkieletu. Brak rozwiązania oznacza, że egzozszkielet nie może osiągać pożądanych pozycji i orientacji, ponieważ znajdują się one poza jego przestrzenią roboczą lub poza obszarem możliwym do osiągnięcia przez kończyny dolne żołnierza.

Mając wykreślony zdyskretyzowany obszar ruchu modelu egzozszkieletu (rys. 5), można wykorzystać sieci neuronowe do sformułowania zależności:

$$(x_2, y_2) = f(Q_1, Q_2) \quad (2)$$

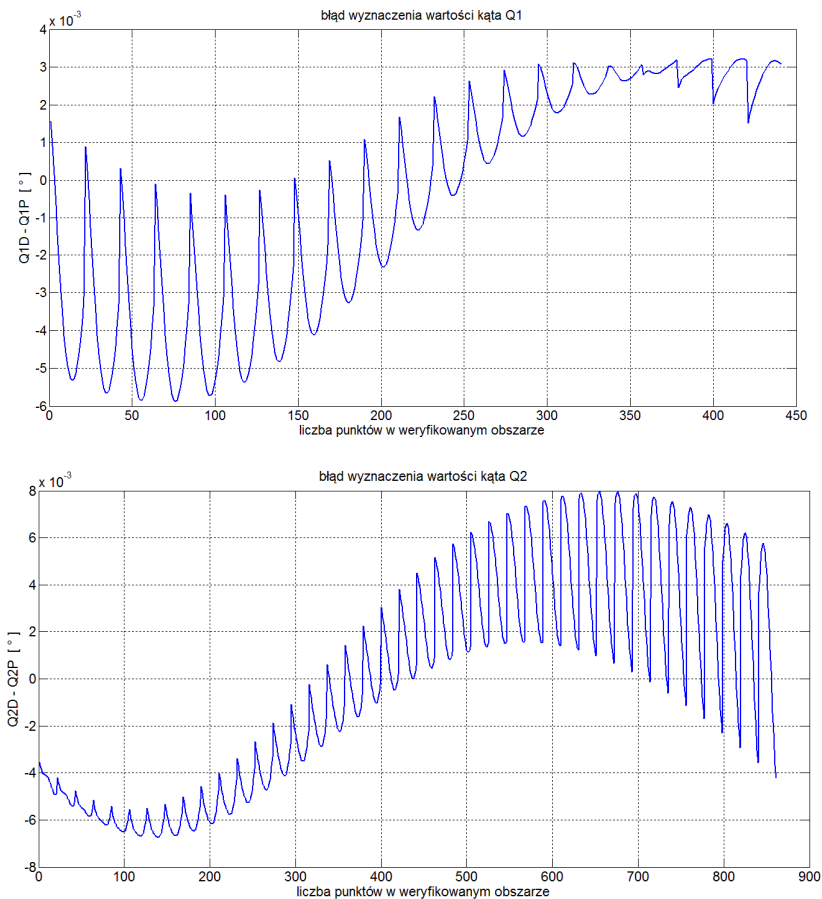
Dane wejściowe (kąty  $Q_1$ ,  $Q_2$ ) dla zadanych parametrów wyjściowych  $(x_2, y_2)$  wyznaczone są w okolicy najbliższych punktów zdyskretyzowanego obszaru ruchu, który został wykorzystany do uczenia sieci neuronowych.



W dalszym etapie projektowania egzoszkieletu oraz w przypadku rozbudowy modelu o kolejne stopnie swobody sieci neuronowe będą elementem składowym całego sterownika. Takie rozwiązanie pozwala zmniejszyć niezbędną moc obliczeniową sterownika ruchu egzoszkieletu oraz zwiększyć płynność zmian współrzędnych odpowiedzialnych za ruch [7]. W dalszym etapie dokonano sprawdzenia zbieżności wyników otrzymanych z wykorzystaniem sieci neuronowych oraz wyników otrzymanych z rozwiązania zadania odwrotnej kinematyki modelu. Parametry sieci neuronowej zostały dobrane eksperymentalnie. Z tego powodu przed zaimplementowaniem sieci neuronowych w sterownik ruchu egzoszkieletu, należy przeprowadzić analizę dokładności odwzorowania w porównaniu do wyników otrzymanych w zadaniu kinematyki odwrotnej [6]. Zastosowanie sieci neuronowej ma na celu „odciążenie” sterownika kosztem dokładności obliczeń. Ważne jednak, by błąd odwzorowania był pomijalnie mały, dlatego po dobraniu parametrów sieci neuronowych należy zweryfikować poprawność dobranych parametrów. Na kolejnym rysunku (rys. 6) przedstawiono błąd odwzorowania kątów egzoszkieletu w odniesieniu do kątów wyznaczonych z równań zadania kinematyki odwrotnej (3).

$$\begin{aligned}
 c2 &= \frac{x^2 + y^2 - (L1)^2 - (L2)^2}{2 \cdot L1 \cdot L2} \\
 s2 &= \sqrt{1 - (c2)^2} \\
 Q2 &= \arctg2(s2, c2) \\
 k1 &= L1 + L2 \cdot c2 \\
 k2 &= L2 \cdot c2 \\
 Q1 &= \arctg2(y, x) - \arctg2(k2, k1) \\
 Q3 &= 90^\circ - Q1 + Q2
 \end{aligned} \tag{3}$$

Na osi rzędnych (rys. 6) pokazany jest błąd predykcji kąta  $Q1$  i  $Q2$ , natomiast wartości na osi odciętych zależą od wielkości obszaru przyjętego do weryfikacji oraz kroku dyskretyzacji tego obszaru.



Rys. 6. Różnica kątów obliczonych analitycznie i kątów wyznaczonych za pomocą sieci neuronowych w określonym obszarze ruchu (opracowanie własne)

Fig. 6. The difference angles calculated analytically and angles determined by the neural network in a specific area of the movement (own description)

Błąd jest wielkością tysięcznych części stopnia, co jest wartością dopuszczalną w analizowanym egzoszkielecie. Dobre sieci neuronowe dla kątów mogą być częścią bardziej rozbudowanego i skomplikowanego systemu regulacji.

## 5. WNIOSKI

Egzoszkielec bojowy to urządzenie mechatroniczne, bardzo mocno zaawansowane technologicznie. W jego konstrukcji zastosowano synergę: mechaniki, elektroniki, automatyki, informatyki oraz szeroko pojętej optymalizacji w procesie projektowania i wytwarzania. Dokonując szerokiej analizy i przeglądu dotychczas funkcjonujących konstrukcji, można właściwie wymienić kilka, które zakończyły się powodzeniem. Wskazuje to na bardzo trudne zadanie, jakim jest osiągnięcie konsensusu pomiędzy podzespołami, których działanie powinno być sprzężone między sobą, a do tego optymalizowane. Wykorzystanie dużej ilości czujników ruchu, tensometrów a także innych bardzo zaawansowanych urządzeń, które dokonują obliczeń napięcia mięśnia, wychylenia stawu, czy samego ruchu żołnierza oraz przekonwertowanie danych na zoptymalizowany ruch, i to w wielu płaszczyznach, nie jest zadaniem łatwym.

Kinematyka dolnych kończyn egzoszkieletu jest bardzo uproszczona i stanowi jedynie wstęp do budowania dalszego modelu. Trudnością okazuje się tutaj rozwiązanie problemu sterowania egzoszkieletem, jako zadanie odwrotne kinematyki. Problem tkwi głównie w niejednoznaczności rozwiązań i sposobie ich dokładnego obliczenia. Proponuje się tutaj skorzystanie z sieci neuronowych, jako nowatorskiego sposobu do rozwiązania problemu regulacji. Trzeba być jednak świadomym, że metoda ta obciążona jest błędem.

W dalszym etapie prac planowana jest analiza dynamiczna, wykonanie modelu rzeczywistego i badania eksperymentalne oraz weryfikacja modelu matematycznego.

## LITERATURA

- [1] Craig J.J., *Introduction to Robotics: Mechanics and Control* (3-rd Edition), Reading: Addison-Wesley, 2004.
- [2] Craig J.J., *Adaptive Control of Mechanical Manipulators*, Reading: Addison-Wesley, 1988.
- [3] Craig J.J., Knapczyk J., *Wprowadzenie do robotyki: Mechanika i sterowanie*, wyd. 2 uzupełn., Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.
- [4] Zielinska T., Autonomous walking machines – discussion of the prototyping problems. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, vol. 58, no. 3, pp. 443-451, 2010.
- [5] Yang L., Chew C.M., Poo A.N., Zielinska T., Real-time bipedal walking adjustment modes based on a trunkated furies series model, *Int. Journal on Humanoid Robotics (IJHR)*, World Scientific, vol. 7, issue 1, pp. 95-126, 2010.

- [6] Szynkiewicz W., Zielinska T., Kasprzak W., Robotized machining of a big work pieces: locatization of supporting heads, *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, Springer, vol. 5, no. 4, pp. 357-369, 2010.
- [7] Zielinska T., Trojnacki M., Dynamical approach to the diagonal gait synthesis: theory and experiments, *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 3-7, 2009.
- [8] Frączek J., Wojtyra M., *Kinematyka układów wieloczłonowych. Metody obliczeniowe*, WNT, Warszawa, 2008.
- [9] Wojtyra M., Frączek J., *Metoda układów wieloczłonowych w dynamice mechanizmów*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2007.
- [10] Decmer D., Amerykańska koncepcja wyposażenia żołnierza przyszłości – Land Warrior i Future Warrior, *Zeszyty Naukowe WSOWL*, nr 1(151), s. 26-42, 2009.
- [11] Kamieński Ł., Amerykański żołnierz przyszłości, *Kwartalnik Bellona*, nr 3 (674), s. 188-201, 2013.
- [12] Mikołajewska E., Mikołajewski D., Egzoszkielety we współczesnych środowiskach zintegrowanych, *Zeszyty naukowe WSOWL*, nr 4(162), s. 246-253, 2011.
- [13] <http://www.bleex.me.berkeley.edu>
- [14] <http://www.lockheedmartin.com/us/products/hulc>
- [15] <http://www.piap.pl>
- [16] <http://www.raytheon.com>

## Military Exoskeleton – Preliminary Kinematic Analysis

Radosław BIELAWSKI, Paweł PISKUR

**Abstract.** The first step in modelling exoskeleton as a type of mechatronic device has been shown in this paper. The military exoskeleton is a type of robot wearing by a soldier to support endurance and strength. Thorough literature analysis of the global constructions has been made since 1890 when the first patent „Apparatus for facilitating walking, running and jumping” had been reported. The main modern requirements of the exoskeleton construction have been determined and presented in this paper. As an example of motion analysis, the kinematics of one leg has been taken under consideration. Moreover, inverse kinematics problem has been solved using fuzzy logic. At the end, the results calculated with inverse kinematic equations and fuzzy logic have been compared.

**Keywords:** automatics and robotics, exoskeleton, mechatronic system, kinematics, modeling